

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ВОКРУГ ОДИНОЧНОЙ ВЫРАБОТКИ

*С.Н. Гапеев, А.О. Логунова, Национальный горный университет, Украина
Б. Палац-Валько, Вроцлавский политехнический университет, Польша*

Актуальность. Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород, который вмещает в себя выработку, является достаточно сложной задачей. Это связано с тем, что существует ряд внутренних и внешних факторов (структура, текстура, особенности программного продукта и т.п.), которые влияют на параметры НДС. Их учет в аналитических исследованиях довольно затруднен. Часто для сокращения объема вычислений исследователи упрощают расчетные схемы путем введения различных допущений, однако подобный подход требует обоснования, чтобы получаемые результаты были близки к реальным.

Из всего многообразия существующих методов оценки НДС массива горных пород следует выбрать такой, который при минимальных упрощениях и оптимальных затратах времени позволит с максимальной степенью реальности отразить процессы, которые происходят вокруг горной выработки.

Введение: В [1-3] приведено аналитическое решение упругопластической задачи плоского деформирования для однородной среды вокруг горизонтальной выработки круглой формы. Расчетная схема, задачи приведена на рис.1 Рассматривалась длинная горизонтальная выработка, которая пройдена в однородном и изотропном породном массиве. Граничные условия для данной задачи следующие: к контуру выработки приложена распределенная нагрузка p_0 , равная отпору крепи, на бесконечности - γH ; объемно-напряженное состояние - гидростатическое. Определялись относительный радиус области неупругих деформаций r_L и радиальные смещения на контуре выработки U_0 .

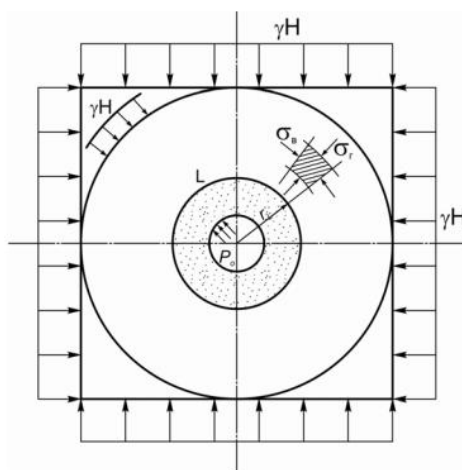


Рис. 1 Расчетная схема к определению напряжений в окрестности горизонтальной выработки (упругопластическая задача) [1]

Зависимости для определения требуемых величин следующие:

$$\frac{r_L^2 \ln r_L}{r_L^2 - 1} = \sqrt{\frac{\gamma H}{R_c k_c}} \quad (1)$$

$$U_0 = \varepsilon_v^* \left(0,5 - \sqrt{\frac{\gamma H}{R_c k_c}} \right) \quad (2)$$

В [1] для конкретного случая (глубина расположения выработки $H = 350$ м; предел прочности на одноосное сжатие $\sigma_c = 25$ МПа; объемный вес $\gamma = 2,50 \cdot 10^{-3}$ МН/м³; радиус выработки $R_0 = 2,0$ м; коэффициент структурно-механического ослабления $k_c = 0,33$; предельное значение объемной деформации в условиях одноосного сжатия $\varepsilon_v^* = -0,1$) эти значения составили : $r_L = 2,3$ м; $U_0 = 0,38$ м.

При выполнении численного моделирования в ПК “RS-2” на основе критерия Хоека-Брауна были использованы те же исходные данные и создавалась расчетная схема, максимально приближенная к приведенной на рис 1 На рис. 2 показана ее конечно-элементная реализация.

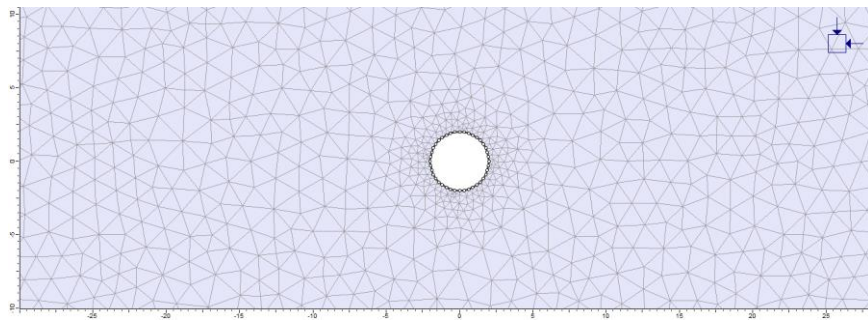


Рис. 2 Конечно-элементная реализация расчетной схемы к задаче об определении напряжений в окрестности горизонтальной выработки

Результаты выполненного численного моделирования данной задачи представлены на рисунке 3

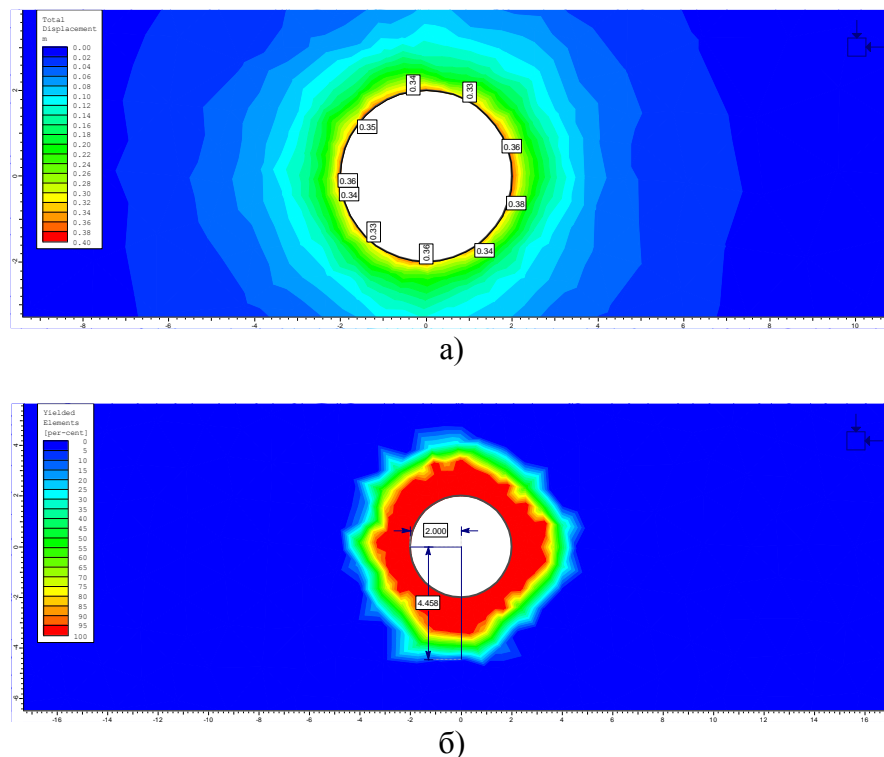


Рис 3 Смещения на контуре выработки (а) и область разрушения (б) при нагружении одиночной выработки круглой формы.

Анализ расчетов показал, что среднее значение величины радиальных перемещений на контуре выработки составляет 0,35 м., а величина относительного радиуса области неупругих деформаций r_L равна 2,23. То есть, сравнивая полученные результаты с аналитическими, можно сделать вывод, что расхождения не превышают 4% для U_0 и 3% для r_L , что является допустимой погрешностью.

Возможности ПК “RS-2” позволяют учитывать в расчете упругопластические свойства вмещающих пород, что, помимо прочего, позволяет моделировать постадийное раскрытие выработок в неупругой среде, учитывая на каждой последующей стадии в качестве начальных те деформации, которые реализованы на предыдущей стадии формирования напряженно-деформированного состояния.

Для проверки достоверности получаемых результатов при решении реальных геомеханических задач с помощью ПК “RS-2” создадим и проанализируем так называемую «тестовую задачу». Для этого построим модель одиночной выработки. Конечно-элементная реализация расчетной схемы тестовой задачи представлена на рис. 4

Задача решается в упруго-пластической постановке. Для условий поставленной задачи начальное поле напряжений, создаваемое весом вышележащих пород для заданной глубины, составляет: $\sigma_y = \gamma H$. Здесь $\gamma = 25 \text{ кН/м}^3$ – объемный вес пород, H – глубина разработки, принятая равной 780 м. Конечно-элементная аппроксимация области осуществлялась посредством элементов-треугольников. Граничные условия задаются в перемещениях: жестко закрепляется нижняя граница, то есть горизонтальные и вертикальные перемещения равны нулю; боковые вертикальные границы также закрепляются в горизонтальном направлении (горизонтальные перемещения равны нулю). Слои вмещающих пород в «тестовой задаче» задаются произвольной мощности.

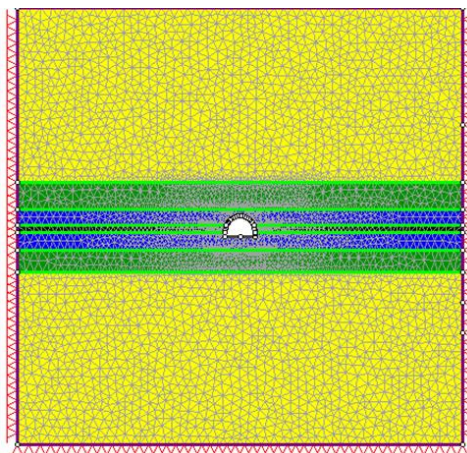


Рис. 4 Конечно-элементная реализация расчетной схемы для решения задачи о перемещениях на контуре

Физико-механические свойства пород и угля, моделируемых в ходе решения численных задач, указаны в табл. 1. К расчету «тестовой задачи» принимались физико-механические свойства аргиллита и алевролита из представленного набора.

Постадийный подход позволяет в плоской постановке задачи провести симуляцию ее 3D модели, когда деформация массива будет происходить поэтапно, имея ввиду, что с подвиганием забоя границы выработки будут продолжать деформироваться, а напряжения будут продолжать меняться. Таким образом, в общем виде выработка не достигает своего «двухмерного» состояния деформации, пока забой не продвинется вперед на расстояние, равное нескольким полупролетам выработки. Схематически это показано на рис. 5.

Таблица 1

Физико-механические свойства вмещающих пород, принятых при моделировании

| № | Название характеристики | Уголь | Аргиллит | Алевролит | Песчаник |
|---|----------------------------------|-------|----------|-----------|----------|
| 1 | Модуль упругости (Юнга), Е, МПа | 3600 | 5900 | 6750 | 11500 |
| 2 | Коэффициент Пуассона, μ | 0,16 | 0,23 | 0,23 | 0,21 |
| 3 | Прочность на сжатие, R_c , МПа | 17 | 20 | 30 | 50 |

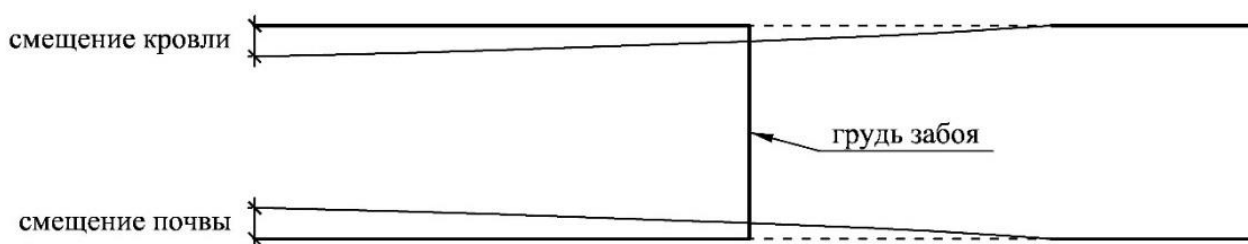


Рис. 5. К вопросу о реализации постадийного решения численной задачи

Постадийный подход может быть реализован двумя способами. Условно назовем первый способ постадийного моделирования – способ «разгрузки», а второй – способ «нагружения».

При *способе «разгрузки»* поэтапное образование выработки в неупругой среде учитывает на каждой последующей стадии в качестве начальных те деформации, которые реализованы на предыдущей стадии формирования НДС. Способ заключается в следующем: изначально к контуру выработки прикладывается распределенная нагрузка, равная в данном случае 19,5 МПа, чем моделируется нетронутый массив по трассе выработки. На каждой последующей стадии величина этой нагрузки постепенно уменьшается вплоть до полного ее снятия на 20-й стадии, которая соответствует раскрытию выработки на полное сечение.

Второй способ - «нагружения», отличается от способа «разгрузки» следующим: изначально моделируется массив, вмещающий выработку, который находится в невесомом состоянии (нагрузка, создаваемая слоем вышележащих пород, равна нулю). На каждой последующей стадии величина нагрузки постепенно увеличивается вплоть до полного нагружения на 20-й стадии до 19,5 МПа, что соответствует раскрытию выработки на полное сечение.

Учитывая, что зона неупругих деформаций (ЗНД) вокруг раскрытой в массиве выработки формируется со скоростью звука для данной среды, т.е. практически мгновенно, развиваясь в последствии в части разрыхления и реализации смещений контура выработки, фактически крепь ставится в выработке в условиях уже реализовавшихся начальных смещений. Они, хотя и невелики, но указывают на изменившееся начальное НДС массива в окрестности выработки, что должно быть учтено в построении численной модели.

Для того, чтобы рассчитать, на какой стадии следует «поставить» в модели крепь, воспользуемся формулой для зоны неупругих деформаций [4], введя в нее параметр k – коэффициент влияния забоя:

$$r_L = \exp\left(\sqrt{\frac{k\gamma H}{2R_c k_c}} - 0,5\right), \quad (3)$$

откуда:

$$k = \frac{2R_c k_c}{\gamma H} (\ln r_L^2 + 0,5)^2 \quad (4)$$

В рекомендациях разработчиков программы [5-11] принято допущение, что крепь устанавливается непосредственно в забое (при этом деформации в забое составляют от одной четверти до одной трети так называемых конечных деформаций, т.е. тех, которые соответствуют деформациям, произошедшим при раскрытии выработки на полное сечение). В этом случае смещения контура, при которых устанавливается крепь, находятся в диапазоне $1/3 \dots 1/2$ конечных деформаций. В реальных же условиях рама крепи обычно устанавливается на некотором расстоянии от забоя, выдерживаемом из соображений удобства выполнения работ. Например, в случае, если крепь устанавливается в 1 м от забоя коэффициент влияния принимает значение $k = 0,4$. Это соответствует 5-ой стадии численного решения (то есть 40% конечных деформаций). Следовательно, для соблюдения соответствия условий модели фактическому технологическому регламенту крепления, крепь в модели в этом случае следует устанавливать на 6-ой стадии расчета.

На рис. 6 показана картина размеров области разрушения в окрестности выработки для модели, в которой для рассмотренных условий рассчитана величина коэффициента влияния забоя.

Библиотека конечных элементов программы позволяет задавать специальные конечные элементы, имитирующие работу податливой рамной крепи. При этом имеется возможность задавать различный уровень податливости, который регулируется числом элементов податливости в конструкции рамы и величиной податливости каждого такого элемента (узла).

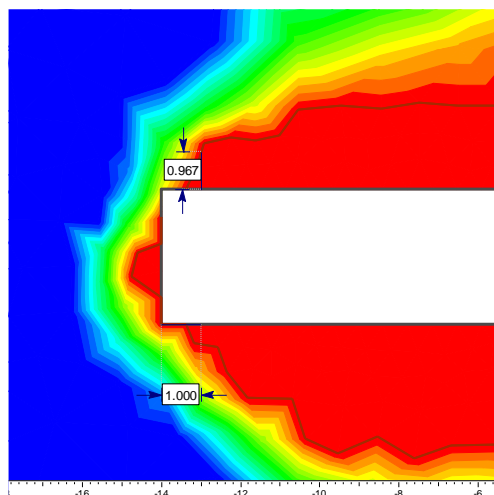


Рис. 6. К расчету величины коэффициента влияния забоя

Задается так называемая степень проскальзывания [11], имеющая смысл процентного уменьшения начальной длины линейного конечного элемента, имитирующего раму крепи, т.е.

$$SG = \frac{n * \Delta L}{P}, \quad (5)$$

где ΔL – величина нахлеста замков, мм; P – периметр крепи, мм; SG – степень проскальзывания, %; n – количество элементов податливости на раме, шт.

Тогда, для трехзвенной арочной крепи КМП-А3, величина проскальзывания, задаваемая в модели крепи, в соответствии с (5), составит 8 %.

Рассмотрим применимость одно- и многостадийного решения к решению задач, поставленных в диссертации, для чего сравним результаты решения для одиночной выработки

в тестовой модели с учетом и без учета установки рамной крепи.

Смещения контура выработки при решении задачи о перемещениях на контуре выработки, решаемой одностадийно, представлена на рис. 7.

Как видно из рис. 7, смещения на контуре выработки в кровле и почве составляют соответственно 1,58 м и 1,56 м.

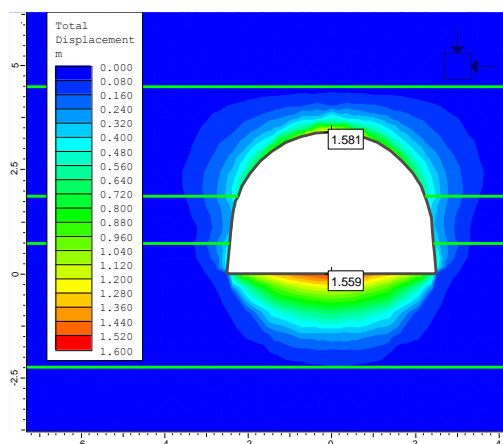


Рис. 7. Смещения контура выработки при решении одностадийной тестовой задачи (без учета крепи)

На (рис. 8, а) приведена конечно-элементная модель для задачи о перемещениях в контуре выработки, решенная с применением многостадийного подхода (20 стадий). На (рис. 8, б) приведена картина перемещений при нагружении по такому подходу одиночной выработки без учета отпора крепи. Смещения на контуре на последней стадии в данной задаче составляли 0,53 м в кровле и 0,64 м в почве, что меньше в сравнении с решением в одну стадию в 2,9 и 2,4 раза соответственно.

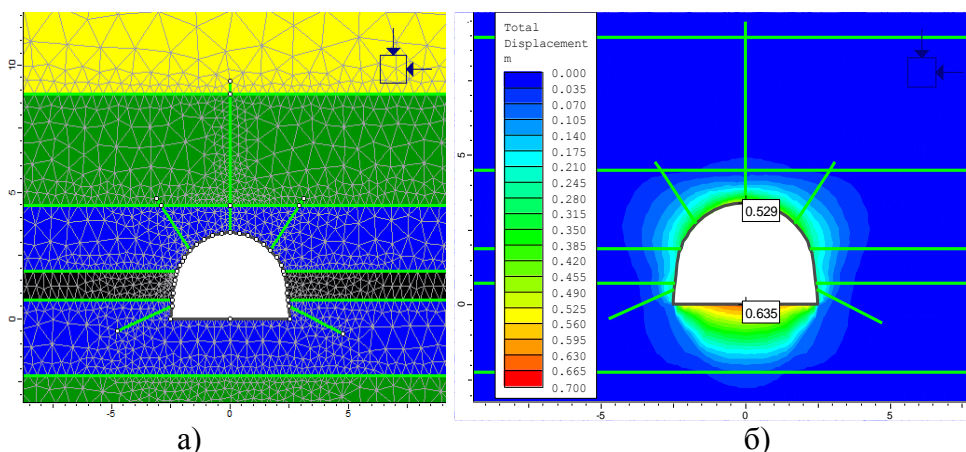


Рис. 8. Конечно-элементная модель(а) и картина перемещений (б) при нагружении для решения задачи о перемещениях в контуре выработки путем многостадийного подхода (без учета крепи)

Следующим шагом при решении тестовой задачи являлось определение НДС в окрестности одиночной выработки с учетом установленной в ней рамной крепи из профиля СВП-27.

Конечно-элементная модель и область разрушения при нагружении одностадийной модели приведены на (рис. 9,а) и (рис. 9,б) соответственно, а на рис. 3.16 – для многостадийного (20 стадий) решения. На (рис. 9,а) разрушение от сдвига показано значком "х", в виде растяжения -"о".

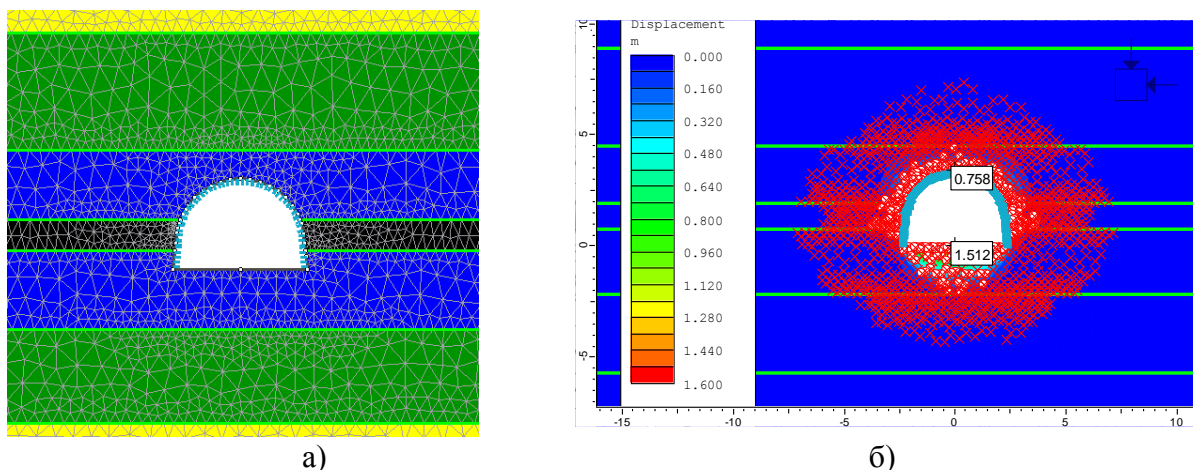


Рис. 9. Конечно-элементная модель с рамной крепью при одностадийном решении (а) и картина перемещений (б) при нагружении модели с рамной крепью

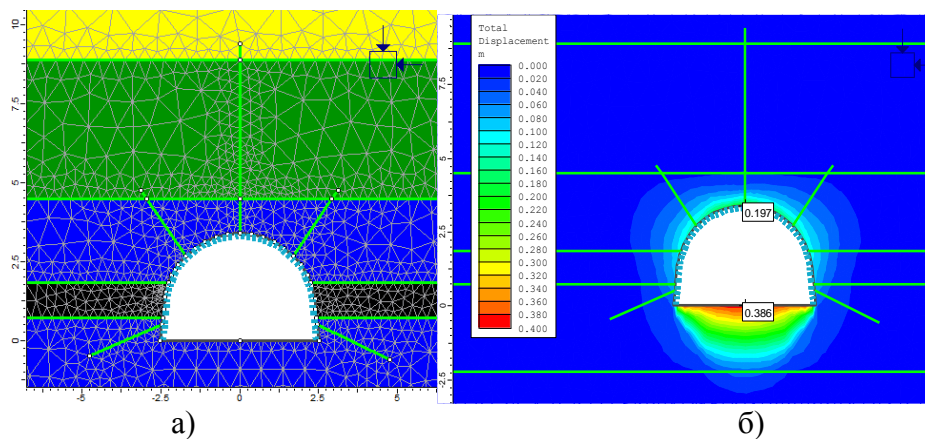


Рис. 10. Конечно-элементная модель одиночной выработки с учетом рамной крепи (а) и картина перемещений (б) при многостадийном решении

Как видно, при одностадийном решении смещения на контуре выработки в кровле и почве составили 0,76 м и 1,51 м соответственно, что указывает на влияние установленной рамы на НДС модели в окрестности выработки (смещения уменьшились в 2,1 раза и 1,03 раза соответственно).

При многостадийном решении на 20-й стадии в кровле выработки получены смещения, равные 0,2 м, а в почве – 0,39 м, что меньше относительно случая без крепи (на 20-й стадии) в 2,7 и 1,6 раза соответственно. Сравнение полученных численных результатов с результатами натурных наблюдений для случая отсутствия влияния лавы (табл. 2.) показывает, что результаты многостадийного решения ближе к полученным при натурных наблюдениях на этапе вне влияния лавы, то есть результаты, полученные при многостадийной задаче лучше коррелируют с результатами натурных наблюдений в схожих горно-геологических условиях, чем результаты одностадийного решения.

Таблица 2

Сравнение влияния стадийности решения численной задачи, с учетом крепи на результаты

| Показатель | Одностадийное решение | Многостадийное решение | Натурные измерения |
|----------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| Смещения в кровле, м | 0,76 | 0,20 | 0,22 |
| Смещения в почве, м | 1,51 | 0,65 | 0,72 |

Выводы:

1. В качестве метода моделирования выбран метод конечных элементов, показавший свою эффективность при решении задач геомеханики.
2. Алгоритм решателя ПК “RS-2” подвергнут верификации путем решения в численном виде задач, имеющих строгое аналитическое решение: упругая задача; упруго-пластическая задача. Анализ результатов показал, что расхождения между аналитической и численными задачами находится в допустимых пределах (максимально – 4%).
3. В качестве критерия прочности при решении упруго-пластической задачи выбран критерий Хока - Брауна, широко используемый в мировой практике геомеханики.
4. На тестовой задаче отработана вычислительная процедура: решение – многостадийное; постановка задачи – упруго-пластическая; обоснованы параметры моделирования рамной податливости крепи и анкеров; стадии расчета, на которых должны устанавливаться элементы крепи.
5. Доказано, что результаты многостадийного решения ближе к полученным при натурных наблюдениях на этапе вне влияния лавы, то есть результаты, полученные при многостадийной задаче лучше коррелируют с результатами натурных наблюдений в схожих горно-геологических условиях, чем результаты одностадийного решения.

Список используемых источников:

1. Шашенко А.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород: Монография / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.Н. Гапеев. – Днепропетровск: НГУ, 2008. – 224 с.
2. Шашенко А.Н. Некоторые задачи статистической геомеханики / А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкова – К.: Універ. вид-во “Пульсари”, 2002. – 304 с.
3. Шашенко А.Н. Упругопластическая задача для структурно-неоднородного массива, ослабленного круглой выработкой / А.Н. Шашенко. – Прикл. механика. – 1989. – т.25, № 6. – С.48-54.
4. Шашенко А.Н. Механика горных пород: Учебник для вузов. / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко – К.: Новий друк, 2003. – 400 с.
5. Hoek E. Practical estimates of rock mass strength / E. Hoek, E.T. Brown // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 1997. – Vol. 34, N 8. – P. 1165–1186.
6. Hoek, E.: Practical Rock Engineering, 2000 Edition, <http://www.rocksolid.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>, 2000.
7. Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002) Hoek-Brown criterion – 2002 edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, 267–273.
8. Sauer, G. Design of tunnel concrete linings using capacity limit curves. in Computer Methods and Advances in Geomechanics, Eds./ Sauer, G., Gall, V., Bauer, E and Dietmaier, P.: Siriwardane & Zaman, 1994, page 2621 - 2626 Rotterdam, NL.
9. Tutorials for Phase 2D elasto-plastic finite element program for slope and excavation stability analyses.
10. Hoek, E. Integration of geotechnical and structural design in tunnelling – 2008 Kersten Lecture. / Hoek, E., Carranza-Torres, C., Diederichs, M.S. and Corkum, B. // Proceedings University of Minnesota 56th Annual Geotechnical Engineering Conference. Minneapolis, 29 February 2008, 1-53.
11. Vlachopoulos, N. Improved longitudinal displacement profiles for convergence-confinement analysis of deep tunnels. / Vlachopoulos, N. and Diederichs, M.S. // Rock Mechanics and Rock Engineering (Accepted - In Press) -2009-16 pgs.